Der Stellenwert der Luftfeuchtigkeit für die thermische Behaglichkeit

Hans-Peter Ritz

1982

Diss. Düsseldorf

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41535714_0101

Aus dem Institut für Arbeitsmedizin

der Universität Düsseldorf

Direktor: Professor Dr. Dr. G. Jansen

Der Stellenwert der Luftfeuchtigkeit für die thermische Behaglichkeit

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

der Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Hans-Peter Ritz

1982

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät

der Universität Düsseldorf

Der Dekan

der Medizinischen Fakultät

der Universität Düsseldorf

gez.: Prof.Dr.Arnold

Referent

gez.: Prof.Dr.Dr.Jansen

Korreferent

gez.: Prof.Dr.Grün

Die vorliegende Arbeit wurde im Institut für Arbeitsmedizin der Universität Düsseldorf unter Anleitung von

Herrn Professor Dr. Dr. G. Jansen

durchgeführt. Ihm möchte ich für das Thema, die Bereitstellung des Arbeitsplatzes und die großzügige Förderung dieser Arbeit danken.

Mein besonderer Dank gilt

Herrn Dr. L. Terhaag

für zahlreiche fruchtbare Diskussionen und seine stetige Betreuung.

Herr Professor Dr. G. Hägele, Institut für Anorganische Chemie der Universität Düsseldorf, ermöglichte mir den Zugang zu einer Großrechenanlage; Herr Dipl. Chem. Dr. H. Dolhaine war mir ein beständiger Gesprächspartner. Ihnen beiden danke ich auf das herzlichste.

UNIV. LEIDEN FARM.

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1.	Einleitung	1
2.	Klimatechnische Voraussetzungen	8
2.1.	Technische Daten der Klimakammer	8
2.1.1.	Maße der Klimakammer	8
2.1.2.	Erzeugung der Klimata	12
2.1.3.	Meßgeräte	21
2.2.	Regelung der klimatischen Parameter	26
3.	Versuchsablauf	36
4.	Versuchsauswertung	42
5.	Ergebnisse und Diskussion	52
5.1.	Erstellung der Behaglichkeitsfunktion	52
5.2.	Behaglichkeitsbereiche und geschlechtsspezifische Einflüsse	59
5.3.	Vergleich mit der Literatur	62
6.	Zusammenfassung	66
7.	Literaturverzeichnis	67
8.	Anhang: FORTRAN-Programm	69

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der thermischen Behaglichkeit des Menschen bei Veränderung der relativen Luftfeuchte unter vorgegebenen konstanten anderen klimatischen Bedingungen. Die Durchführung einer Versuchsreihe hierzu mit Hilfe einer geeigneten Klimakammer wird beschrieben und die Versuchsauswertung mittels eines FORTRAN-Programmes erläutert. Eine abschließende Diskussion vergleicht die gewonnenen Ergebnisse mit denen früherer Autoren und beleuchtet den Stellenwert, den die relative Luftfeuchte für die thermische Behaglichkeit innehat.

Die Definition des Klimas, so wie sie in dieser Arbeit verwendet werden soll, umfaßt die Gesamtheit der Elemente

Lufttemperatur der Umgebung
Strahlungstemperatur der Umgebung
Luftgeschwindigkeit
relative Luftfeuchte

Jede dieser vier Gegebenheiten muß nicht notwendigerweise durch einen einzigen Zahlenwert genau

zu beschreiben sein, sondern kann an verschiedenen Körperstellen eines Menschen unterschiedliche Werte annehmen. So ist es z.B. eine geläufige Erfahrung, daß in einem abgeschlossenen Zimmer mit Ofenheizung ohne forcierte Konvektion (Gebläse) von der Decke bis zum Boden Temperaturdifferenzen von mehreren ^{o}C auftreten können, daß lokale Maxima der Luftbewegung als 'Zug' empfunden werden können usw. Wenn es auch heute möglich ist, in vielen Gebäuden thermische Bedingungen zu schaffen, die von den meisten Menschen als angenehm empfunden werden, so erschweren diese Erscheinungen doch die Analyse eines gegebenen Klimas. Angesichts der vielen thermischen Interaktionen des Menschen mit seiner Umgebung auf dem Wege über Konvektion, Strahlung, Kondensation oder Verdampfen von Wasser usw. ist es ein Problem, alle möglichen Parameterkombinationen festzulegen, die zur thermischen Behaglichkeit führen.

Unter 'Behaglichkeit' soll hier und im folgenden 'die Gemütsverfassung, die Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung ausdrückt' , verstanden werden (übersetzt nach (4,S.13)). Zur Beurteilung grober Abweichungen vom behaglichen Klima, z.B. für Arbeitsplätze unter Wärmebelastung, sind seit etwa 1925 zahlreiche Untersuchungen angestellt

worden. Eine Zusammenstellung hierzu findet sich in (7,S.604). Einige der Ergebnisse basieren auf der Messung der Veränderung von physiologischen Parametern wie z.B. der Rektaltemperatur (9), der Schweißproduktion (10) oder der Pulsfrequenz (13). Andere Autoren registrierten die in einem belastenden Klima zu beobachtende Verminderung der Arbeitsleistung (11) oder ließen eine Reihe von Versuchspersonen das zu testende Klima mit einem standardisierten Klima vergleichen (8),(12).

Den zitierten und noch vielen anderen Untersuchungen liegt der Wunsch zugrunde, alle möglichen oder zumindest alle wichtigen Kombinationen der das Klima bestimmenden Parameter zu einer Größe zusammenzufassen, die eine Aussage über die Belastung des Menschen durch das ihn umgebende Klima macht. Die Ergebnisse münden teilweise in der Konstruktion spezieller Thermometer (Feuchtthermometer, Globethermometer), deren Anzeige das Gewünschte leisten soll, teilweise in der mathematischen Definition von bestimmten Temperaturen, zu deren Berechnung verschiedene Klimagrößen gemessen oder abgeschätzt werden müssen (Wet-Bulb-Globe-Temperature, Amerikanische Effektivtemperatur, Belgische Effektivtemperatur u.a.) (7,S.590ff). Ohne hier weiter auf Einzelheiten einzugehen, kann man zusammenfassend

sagen, daß grobe Abweichungen vom als behaglich empfundenen Klima in ihrer Auswirkung auf den Menschen durch viele Untersuchungen hinreichend genau bekannt sind, auch wenn die Resultate verschiedener Autoren nicht in allen Punkten übereinstimmen (7,S.590ff).

Es sei erwähnt, daß man sich in der letzten Zeit unter dem wirtschaftlichen Druck hoher Energiekosten darauf besonnen hat, welche Rolle die mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung auf die thermische Behaglichkeit des Menschen hat: eine verbesserte Isolation der Außenwände verringert nicht nur den Wärmeverlust eines Gebäudes, sondern ermöglicht auch thermische Behaglichkeit bei einer niedrigeren Lufttemperatur, weil die Wandtemperatur im Innern nun höher ist und damit der Wärmeverlust des menschlichen Körpers durch Strahlung geringer wird. Bei der in Wohnräumen häufig getragenen leichten Kleidung und der vorliegenden geringen Luftbewegung ist der Einfluß der mittleren Strahlungstemperatur auf die Behaglichkeit besonders ausgeprägt und entspricht in seiner Größe dem der Lufttemperatur (4,S.61).

Als mittlere Strahlungstemperatur t_{mrd} soll hier

und im folgenden die Temperatur einer einheitlich schwarzen Umgebung bezeichnet werden, die den gleichen Strahlungsverlust einer Person erzeugt wie die gegebene Umgebung. Die allgemeine Berechnung dieser Temperatur ist aufwendig, doch läßt sich zeigen, daß bei einer einheitlichen Oberflächentemperatur der begrenzenden Wände eines Raumes $t_{surface}$ mit hinreichender Genauigkeit auch bei nicht schwarzen Flächen

$$t_{mrd} = t_{surface}$$

gilt (4,S.143ff). In dieser Arbeit, die sich nicht mit dem Einsatz von Heizstrahlern oder sonstigen Strahlungsquellen beschäftigt, werden daher beide Temperaturen miteinander identifiziert.

Der Einfluß der Luftfeuchte in einem belastenden Arbeitsklima war Gegenstand vieler Untersuchungen, und es darf als ein gesichertes Ergebnis gelten, daß bei konstantem Energieumsatz eines Menschen in einer als zu warm empfundenen Umgebung das Klima bei steigender Raumtemperatur nur dann erträglich bleibt, wenn die Luftfeuchtigkeit abnimmt (7,S.592). Die Erträglichkeit eines zu warmen Klimas hängt stark von der Luftfeuchte ab, weil der Mensch auf das Dampfdruckgefälle von der Hautoberfläche zur umgebenden Luft angewiesen ist, um durch perspiratio

sensibilis seine Wärmebilanz zu sichern. Eine ausgeglichene Wärmebilanz ist für die thermische Behaglichkeit jedoch eine nur notwendige Voraussetzung und das Vorliegen von perspiratio sensibilis ist mit dem thermischen Behaglichkeitsempfinden genausowenig vereinbar wie etwa das Muskelzittern. Die bisherigen Untersuchungsergebnisse zur thermischen Behaglichkeit als Funktion der Luftfeuchte sind insgesamt weniger zufriedenstellend und lassen keine so eindeutige Aussage zu, wie es bei den Versuchen zur Klimaerträglichkeit der Fall ist. Hinzu kommt, daß der Vergleich vieler Experimente diesbezüglich dadurch erschwert ist, daß in ihnen Parameter, die das Klima definieren oder die Behaglichkeit beeinflussen (Energieumsatz, Isolationswert der Bekleidung usw.), voneinander abweichen oder nicht vollständig mitgeteilt werden (4,S.64ff). Selbst wenn von den Versuchsbedingungen her ein Vergleich möglich ist, kommen Differenzen in den Aussagen bezüglich der Behaglichkeitstemperatur in der Größenordnung von $1^{o}C$ vor. Abbildung 1 veranschaulicht, wie unterschiedlich verschiedene Autoren den Einfluß der Feuchte werten, wenn die Versuchsbedingungen vergleichbar sind. Angesichts dieser Divergenzen und der heutigen Möglichkeiten der

Klimatechnik versteht sich diese Arbeit als Versuch, unter standardisierten Bedingungen die Abhängigkeit der Behaglichkeitstemperatur von der relativen Luftfeuchte zu analysieren.

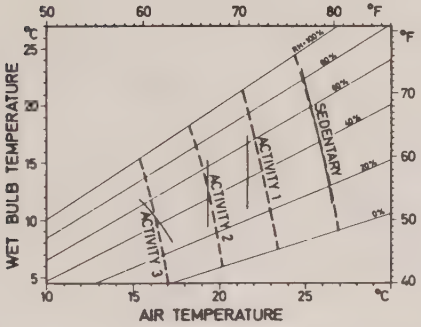

Abb. 1 : Behaglichkeitstemperatur als Funktion der relativen Luftfeuchte. Ein Vergleich der Ergebnisse von FANGER (4) (gestrichelte Linien) und NEVINS&McNALL (5),(6) (durchgezogene Linien) nach (4,S.66).

Isolationswert der Bekleidung 0,6 clo

$t_{mrd} = t_{air}$

Energieumsatz und Luftbewegung:

SEDENTARY : 50 kcal/m^2hr, 0,1 m/s
ACTIVITY 1: 80 kcal/m^2hr, 0,2 m/s
ACTIVITY 2: 106 kcal/m^2hr, 0,25 m/s
ACTIVITY 3: 135 kcal/m^2hr, 0,32 m/s

2. Klimatechnische Voraussetzungen

2.1. Technische Daten der Klimakammer

2.1.1. Maße der Klimakammer

Die im Abschnitt 3. beschriebenen Versuche wurden in der Klimakammer im Untergeschoß des Instituts für Arbeitsmedizin beim Staatlichen Gewerbearzt Düsseldorf durchgeführt. Die Kammer besteht aus einem quaderförmigen 2,6 m breiten, 2,8 m tiefen und 2,4 m hohen Raum, der gegen die Umgebung durch eine reflektierende Aluminiumbeschichtung, Isoliermaterial und Mauerwerk abgeschirmt ist. Der Boden ist aus einer ca. 30 cm hohen Gitterkonstruktion dünner Stahlprofile angefertigt, auf denen abnehmbare Kunststoffplatten so aufliegen, daß ein hermetisch abgeschlossener Luftraum entsteht. Diese Anordnung dient zum einen der thermischen Isolation des Fußbodens, zum anderen ermöglicht sie es, Rohrleitungen und Kabel zu verschiedenen Punkten der Kammer zu führen, ohne daß sie mit dem Innenraum Kontakt aufnehmen. Eine der Bodenplatten ist zu einem großkalibrigen verschließbaren Luftschacht hin durchbrochen und gestattet so, die Kammer mittels eines hierfür vorgesehenen Ventilators mit Frischluft zu beschicken. Unter der Decke

befindet sich ein Gitterrost, der Meßkabel und Schlauchleitungen trägt, die zu den von der Decke herabhängenden Meßwertgebern und den zwei Strahlertürmen führen, die im folgenden noch näher beschrieben werden. Die Kammer kann durch eine seitlich angebrachte Tür betreten werden, die im geschlossenen Zustand thermische und hermetische Isolation gewährleistet. Ein 1 m x 1 m großes Isolierglasfenster ermöglicht der Versuchsperson den Blickkontakt mit dem am Schaltpult sitzenden Versuchsleiter, nicht jedoch die Sicht auf die Steuereinrichtungen. Da die Kammer schallisoliert ist, erfolgt der akustische Kontakt bei Bedarf über eine Gegensprechanlage.

Beiderseits an den Wänden befinden sich 'Klimaschränke', die der Luftaufbereitung und -umwälzung dienen. In der Mitte der Kammer nimmt die Versuchsperson auf einem Stuhl Platz. Aus ihrer Sicht rechts vorn und links hinten stehen vom Boden bis ca. 40 cm unter die Decke reichende drehbare Strahlertürme, die jeweils an einer Seite mit Infrarotstrahlern, an der anderen mit Kühlplatten besetzt sind. Auf diese Weise ist es möglich, die mittlere Strahlungstemperatur des Innenraumes zu beeinflussen.

Die Abbildungen 2 und 3 veranschaulichen die

Grundzüge der eben beschriebenen Konstruktion, Abb. 4 zeigt den Blick auf das Schaltpult.

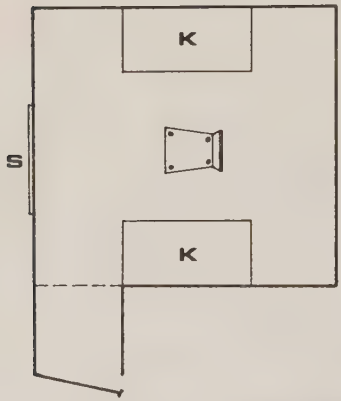

Abb. 2 : Grundriß der Klimakammer
K = Klimaschrank, S = Sichtfenster

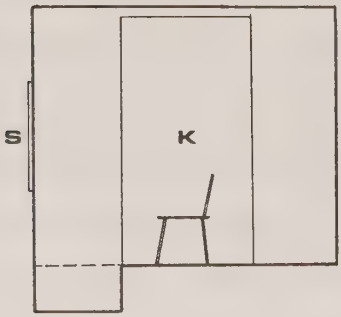

Abb. 3 : Seitenansicht der Klimakammer
Beide Abb. im Maßstab 1:50 gezeichnet

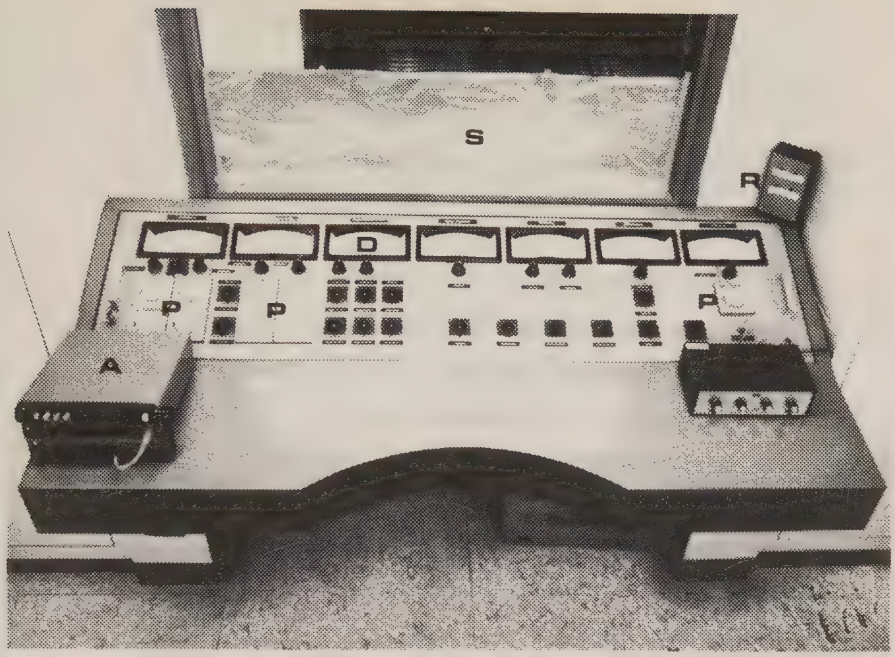

Abb. 4 : Blick auf das Schaltpult der Klimakammer

Man erkennt:

A : Aspirationspsychrometer: Rechner und Anzeigeeinheit
P : Potentiometer zur Sollwerteinstellung
D : Drehspulinstrumente
S : Sichtschutzfolie
R : Anzeige der Reglerausgänge

2.1.2. Erzeugung der Klimata

Im folgenden soll beschrieben werden, wie es möglich ist, im Versuch bestimmte klimatische Bedingungen zu erzeugen, die durch die Werte der Parameter

Lufttemperatur	t_{air}	
mittlere Strahlungstemperatur	t_{mrd}	
Luftgeschwindigkeit	v	und
relative Luftfeuchte	rH	

charakterisiert werden. Um diese Größen beeinflussen zu können, befinden sich in der Kammer Vorrichtungen, die jedoch im allgemeinen auf mehr als nur eine der genannten Variablen wirken, so daß Regelvorgänge notwendig werden können, um bei gewünschter Veränderung einer Größe die anderen klimatischen Parameter konstant zu halten. Wird z.B. die Kammer durch das Einblasen heißen Wasserdampfes befeuchtet, muß der damit einhergehenden Erhöhung der Lufttemperatur durch Kühlung entgegengewirkt werden. Die aus solchen Interaktionen entstehenden regeltechnischen Probleme werden im Abschnitt 2.2. gesondert besprochen werden.

Als Stellglieder stehen zur Verfügung:

Strahlertürme

Die zwei Strahlertürme sind zylindrische Aluminiumkörper von 50 cm Durchmesser und 200 cm Höhe, die in einer Halterung so befestigt sind, daß sie durch einen Befehl vom Schaltpult aus um 180° gedreht werden können. Eine Seite jeden Turmes trägt vier 40 cm x 40 cm messende Aluminiumplatten, die von einem Kältmittel (Sole) durchströmt werden können. Die Oberfläche der Platten kann auf diese Weise Temperaturen zwischen der Kammerlufttemperatur und ca. -10°C annehmen. Der geforderte Wert wird durch Regelung des Soledurchflusses mittels eines Magnetventils stabilisiert, wobei die Einstellungen der beiden Türme unabhängig voneinander sind. Anfallendes Schmelz- oder Kondenswasser wird durch hierfür vorgesehene Auffangtrichter und Ablaufschläuche selbsttätig aus dem Versuchsraum entfernt.

Die auf der anderen Seite jeden Turmes angebrachten fünf Keramik-Infrarotstrahler haben pro Stück eine maximale Leistung von 600 Watt. Damit lassen sich über eine AEG-Thyrotact Vollwellensteuerung für jeden Turm Flächentemperaturen zwischen ca. 50°C und 500°C einstellen. Eine Regelung der Temperatur ist nicht vorgesehen, jedoch kann der aktuelle Wert auf einem Meßgerät abgelesen und so im

Bedarfsfalle nachgestellt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, einzelne Strahler abzuschalten, um die Wärmestrahlung auf bestimmte Körperhöhen zu beschränken. Ein Gitterkorb schützt die Versuchsperson davor, die Heizplatten zufällig zu berühren.

Luftumwälzung

In jedem Klimaschrank arbeiten vier Ventilatoren von je 40 cm Durchmesser und einer maximalen Förderleistung von 5000 m^3/h. Ihre Leistung wird über einen Ringtransformator eingestellt, dessen Schleifer vom Schaltpult aus durch einen Elektromotor bewegt werden kann. Eine einmal gewählte Luftgeschwindigkeit bleibt durch diese Art der Ansteuerung erhalten, bis ein neuer Befehl ergeht. Aus der Sicht der Versuchsperson bewegt sich die Luft in beiden Schränken von hinten nach vorn. Vor dem Fenster vereinigen sich die beiden Luftströme, ändern ihre Richtung um 180° und strömen die Versuchsperson frontal an. Auf diese Weise kann sie verschiedenen Windgeschwindigkeiten im Bereich von 0 m/s bis 3 m/s ausgesetzt werden. An der Rückwand der Kammer befindet sich ein zusätzlicher Umluftventilator, der der Be- und Entfeuch-

tung dient, ohne die eben beschriebene Luftumwälzung wesentlich zu beeinflussen.

Heizung

Die Klimakammer besitzt drei schaltbare Heizungen von je 3 kW Leistung, die jeweils auf beide Klimaschränke aufgeteilt sind. Mit ihnen kann man innerhalb kurzer Zeit die Kammertemperatur erhöhen. Um eine gewünschte Temperatur konstant halten zu können, ist zusätzlich eine geregelte Heizung vorhanden. Die hiermit maximal erreichbare Temperaturerhöhung beträgt etwa $0{,}2\,^{\circ}C/min$.

Kühlung

In beiden Klimaschränken befinden sich Kühlregister, an denen sich die vorbeiströmende Luft abkühlt, wenn durch einen Reglerbefehl das zugehörige Magnetventil für die Kühlflüssigkeit (Sole) geöffnet worden ist. Die Sole entstammt einem im Maschinenkeller eingebauten 1,8 m^3 fassenden Behälter, dessen Inhalt durch ein wärmeisoliertes Rohrleitungssystem in die Kühlregister der Kammer gepumpt werden kann. Die Temperatur des Reservoirs ist bis etwa $-15\,^{\circ}C$ einstellbar. Zu seiner Kühlung

dienen zwei Freon-Kompressor-Solekühler von je 7 kW Leistung. Sie werden im Normalfall so betrieben, daß eine Maschine nur das Becken kühlt, während die zweite bei Bedarf die Sole vor Eintritt in das Rohrsystem zur Kammer kühlt. Dieser Sachverhalt wird durch Abbildung 5 erklärt, in der auch der Anschluß des Entfeuchteregisters angedeutet ist.

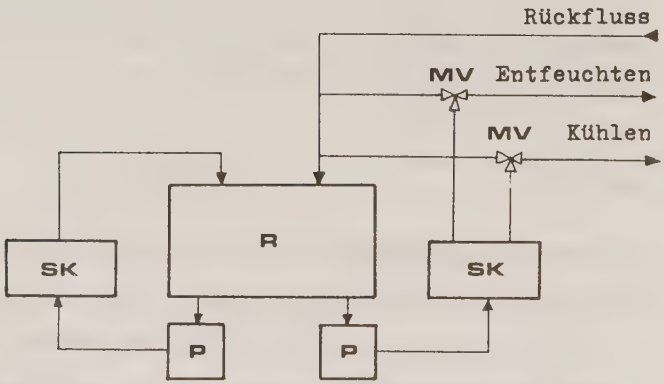

Abb. 5 : Solefluß im Normalbetrieb. Zur Vereinfachung sind nur die wichtigsten Verbindungen skizziert worden; die Anschlüsse der Strahlertürme sind nicht eingezeichnet. (SK=Solekühler, R=Reservoir, P=Pumpe, MV=Magnetventil)

Zu Wartungszwecken ist es mit Hilfe von Handventilen möglich, die Aufgaben der Maschinen zu vertauschen, sie von der Kammer zu trennen oder mit beiden Pumpen direkt die Register zu beschicken, was z.B. bei der Entlüftung der Rohre nützlich ist. Bei Ausfall der Pumpe eines Kompressors kann nach Öffnen eines Mischrohres die andere Pumpe beide Kompressoren versorgen.

Die Maschinen schalten sich abhängig von der Temperatur in ihrer Ansaugleitung mit einer auf ca. 3°C eingestellten Hysterese ein und aus, so daß die Temperatur des Beckens etwa um diesen Betrag schwankt. Bei Überdruck oder Überhitzung einer Maschine oder beim Einfrieren des Kältemittels wird der betroffene Kompressor automatisch abgeschaltet und der Störfall am Schaltschrank angezeigt. Da die zugehörige Pumpe weiterläuft, ist der Betrieb mit nur einem Kompressor grundsätzlich möglich, wie aus dem Soleflußplan, Abbildung 5, ersichtlich ist. Hierbei ist jedoch die Leistungsfähigkeit des Kühlsystems herabgesetzt und es besteht die Gefahr, daß durch die Pumpenleistung von je 2,2 kW die Sole überhitzt wird, wenn der zweite Kompressor ausfallen sollte. Abbildung 6 zeigt den Blick auf eine der beiden Maschinen.

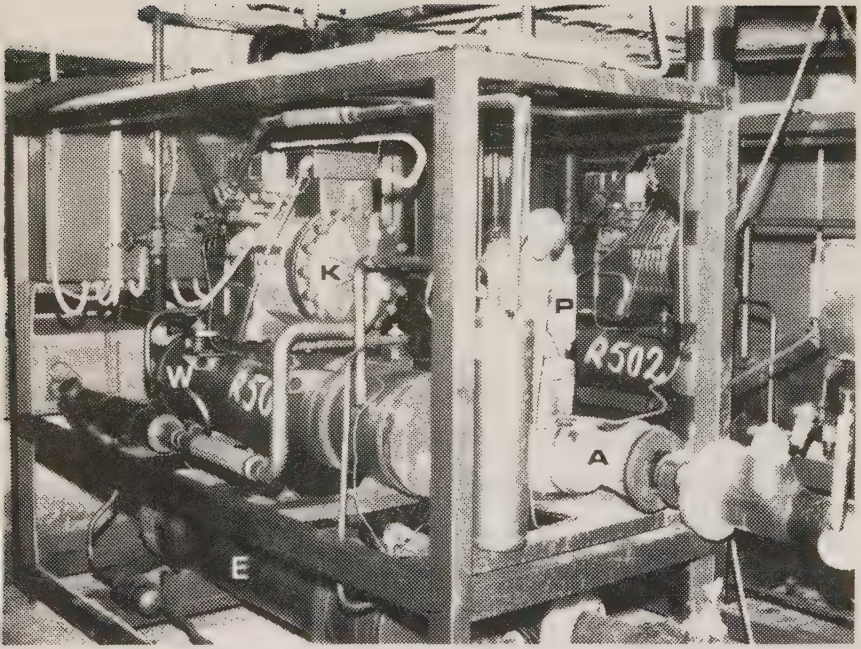

Abb. 6 : Solekühler mit Pumpe

Zu erkennen sind:

K : Kompressor (mit Kühlrippen)
W : Freon-Wärmetauscher
E : Expansionskammer (z.T. vom Rahmen verdeckt)
A : Ansaugleitung
P : Pumpe

Im Hintergrund rechts der zweite Solekühler

Be- und Entfeuchter

Um bei Bedarf die Luftfeuchte in der Klimakammer erhöhen zu können, ist im Maschinenkeller ein Befeuchter vorgesehen, der durch hitzebeständige Schläuche mit der Kammer verbunden ist. Liegt ein Befeuchtesignal vor, werden Magnetventile geöffnet, die den Zulauf zu zwei Behältern regeln, in denen Wasser durch Kontakt mit zwei Flächenelektroden erhitzt und verdampft wird. Um ein Ansammeln ausfallender Verunreinigungen zu verhindern,werden die Befeuchtertöpfe durch einen automatischen Zeitgeber abwechselnd entleert. Das so geschaffene Zusammenspiel zwischen Zulauf, Verdampfung und Ablauf bewirkt, daß die Befeuchtung mit einer Verzögerung einsetzt, die bis zu 25 Minuten betragen kann. Eine über die Zustände AN/AUS hinausgehende Regelung der Verdampferleistung von ca. 3 kW ist nicht vorgesehen, so daß die relative Feuchte der Kammerluft schnell ansteigt, wenn die Dampferzeugung begonnen hat. Bei 20°C Lufttemperatur kann man mit einer Zunahme von ca. 5% rH/min rechnen. Der entstehende Dampf wird durch zwei Schläuche in den rückwärtigen Teil der Kammer geleitet und dort dem Luftstrom eines zusätzlichen Umluftventilators

beigemischt. Seine Auslaßöffnung ist so gestaltet, daß die ausströmende Luft zum weitaus größten Teil zuerst die Klimaschränke passiert, ehe sie die Versuchsperson erreicht. Im Ansaugschacht dieses Ventilators befindet sich, zur Kammer hin abgeschirmt, ein Kühlregister, das über ein Magnetventil mit Sole versorgt wird (vgl. Abb. 5). Hieran kann durch Kondenswasserbildung die Kammerluft entfeuchtet werden. Die entstehenden Tropfen werden durch einen Auffangtrichter und ein Ablaufrohr aus dem Versuchsraum entfernt. Wenn man berücksichtigt, daß die am Entfeuchteregister vorbeistreichende Luft nur bis auf die Soletemperatur gekühlt werden kann und dann gesättigt ist, geht aus dem Gesagten hervor, daß die erreichbare minimale relative Luftfeuchte durch die Lufttemperatur t_{air} und die Soletemperatur t_{Sole} bestimmt wird. Die theoretische Grenze ist erreicht bei

$$rH_{min} = \frac{{}^{s}t_{Sole}}{{}^{s}t_{air}} ,$$

wobei s die jeweilige maximale absolute Feuchte bezeichnen soll. Nimmt man bei $t_{air} = 28^{\circ}C$ am Entfeuchteregister den Soleeintritt mit $t_{Sole} = -10^{\circ}C$ an, gilt nach (15,S.262) für rH_{min}:

$$rH_{min} = \frac{2{,}14 \text{ gr/m}^3}{27{,}2 \text{ gr/m}^3} = 8\% \quad .$$

Der in der Praxis erreichbare Wert liegt bei ca. 20% rH, was für die vorliegende Untersuchung als ausreichend angesehen werden kann.

2.1.3. Meßgeräte

In diesem Abschnitt sollen die Meßgeräte beschrieben werden, mit denen die in der Kammer herrschenden klimatischen Bedingungen festgestellt werden können. Sie dienen ausschließlich der Registrierung und sind in keinen Regelvorgang einbezogen. So kann man z.B. mit Hilfe von Halbleiterfühlern die Temperatur der Kammer an verschiedenen Stellen messen, ohne in die Regelung einzugreifen. Die Anzeige der Meßgeräte erfolgt am Schaltpult mit großen, gut ablesbaren Drehspulinstrumenten. Um ihre Auflösung zu erhöhen, sind jeweils zwei bis drei Meßbereiche vorgesehen, die über Schalter gewählt werden können. Die als Stromquellen konzipierten Ausgänge der Meßverstärker ermöglichen, über eine Steckerleiste einen Mehrkanal-Klimadatenschreiber anzuschließen, so daß der Versuchsablauf automatisch protokolliert werden kann.

Lufttemperatur

Zur Lufttemperaturmessung stehen sechs Halbleiterfühler zur Verfügung, von denen über einen Wahlschalter jeweils einer mit dem zugehörigen Meßverstärker und Anzeigeinstrument verbunden ist. Zwei dieser Thermometer hängen im Luftstrom vor der Versuchsperson und jeweils eines direkt vor Ein- und Auslaß der beiden Klimaschränke. Hierdurch kann man überprüfen, ob die Klimaschränke bei Vorliegen eines Heizsignals in gewünschter Weise arbeiten und beim Kühlen feststellen, wann die Sole die Kälteregister der Schränke erreicht hat. Das Erkennen dieses Zeitpunktes ist wichtig, wie in Abschnitt 2.2. noch dargelegt werden wird.

Flächentemperatur

Wie bereits bei der Beschreibung der Strahlertürme in Abschnitt 2.1.2. erwähnt wurde, kann die Flächentemperatur der Infrarotstrahler am Schaltpult abgelesen werden und gegebenenfalls manuell korrigiert werden. Die Temperatur der Kühlplatten wird nicht angezeigt, ist jedoch für jeden Turm separat an einem skalierten Potentiometer einstellbar und wird mit einer Magnetventil-Regelung konstant gehalten.

Da in den durchgeführten Versuchen die Strahlertürme nicht angesteuert wurden, soll hier auf weitere Einzelheiten nicht eingegangen werden.

Um einzelne Flächentemperaturen im Versuchsraum messen zu können, sind acht Kontaktthermometer vorhanden, von denen jeweils eines über einen Drehschalter mit dem Anzeigeinstrument am Schaltpult in Verbindung steht. Da bei der vorliegenden Versuchsserie eine von der Lufttemperatur t_{air} abweichende Flächentemperatur nicht erwünscht war, wurde auf eine stichprobenartige Registrierung von acht einzelnen Flächentemperaturen verzichtet und statt dessen durch einen Versuch eine indirekte Aussage über die mittlere Flächentemperatur t_{mrd} erhalten. Nach (7,S.595) ist die Temperaturmessung mit dem Globe-Thermometer dazu geeignet, eine von der Lufttemperatur t_{air} abweichende mittlere Strahlungstemperatur t_{mrd} zu erkennen. Unter den gewählten Versuchsbedingungen (s.Abschnitt 3.) ließ sich zeigen, daß die Globe-Temperatur einer schnellen Änderung der Lufttemperatur um $\Delta t_{air} = 2^{o}C$ mit einer Verzögerung von ca. 3 min folgt.
Da die benötigte Ausgleichszeit während der einzelnen Versuche in jedem Fall sichergestellt war, ist die Annahme $t_{air} = t_{mrd}$ gerechtfertigt.

Diese beiden Größen werden deshalb im folgenden häufig nicht mehr einzeln angesprochen, sondern als 'Kammertemperatur' t_K bezeichnet.

Luftgeschwindigkeit

Mit sechs geeichten Hitzdrahtanemometern läßt sich die Stärke der Luftbewegung im Bereich von 0,1 m/s bis 5 m/s feststellen. Von diesen dienen zwei dazu, die Arbeit der Umluftventilatoren zu kontrollieren, während mit den restlichen vier Anemometern die Strömungsgeschwindigkeit vor und seitlich der Versuchsperson gemessen wird. Eine verschiebbare Hülse auf dem Schaft jeden Instrumentes gestattet es, nach Versuchsende die empfindlichen Hitzdrähte vor Beschädigung oder Verstaubung zu schützen.

Luftfeuchte

Zur Registrierung der relativen Luftfeuchtigkeit finden zwei Geräte Verwendung, die in Kammermitte am Gitterrost unter der Decke befestigt sind. Diese Meßwertgeber enthalten Dehnungsfolien, deren Längenänderungen auf verstellbare Widerstände übertragen werden. Durch eine automatische Temperaturkompensation kann am zugehörigen Instrument die relative

Feuchte abgelesen werden, wobei die Trägheit der Geber im Auge zu behalten ist: einer plötzlichen Änerung der relativen Luftfeuchte um 10% rH vermögen die Meßwertgeber in ca. 2 min zu folgen.

Aspirationspsychrometer

Zusätzlich zu den bisher beschriebenen Meßgeräten steht ein Aspirationspsychrometer zur Verfügung, das an einem Stativ seitlich neben der Versuchsperson an der Kammerwand befestigt ist. Die durch einen kleinen Ventilator angesaugte Kammerluft umspült ein Trocken- und ein Feuchtthermometer, deren Meßwerte einem Digitalrechner am Schaltpult übermittelt werden. Nach einer Rechenzeit von ca. 4 sec kann die relative Luftfeuchte mit einer Auflösung von 1% rH als zweistellige Zahl abgelesen werden, was der vom Hersteller garantierten Genauigkeit entspricht. Für die als dreistellige Digitalanzeige ablesbare Trocken-, Feucht- und Taupunkttemperatur beträgt der entsprechende Wert $0{,}1\,^{\circ}C$. Die mit diesem Instrument festgestellten Meßwerte bilden die Grundlage der Versuchsauswertung (s.Kapitel 4.).

2.2. Regelung der klimatischen Parameter

In diesem Abschnitt sollen die Regeleigenschaften der Klimakammer erörtert und hieraus die Konsequenzen für die Art der Versuchsdurchführung erläutert werden. Es werden allgemeine Begriffe der Regelungstechnik verwendet, die DIN 19226 (1954) folgen (1,S.34).

Ein einfaches Modell eines Regelkreises ist in Abbildung 7 skizziert.

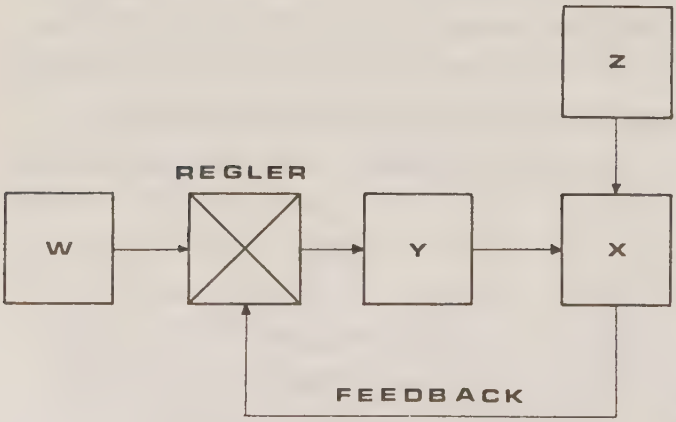

Abb. 7 : Regelkreismodell

Eine Regelgröße X (Istwert) ist mit Hilfe einer Stellgröße Y einer Führungsgröße W (Sollwert) anzugleichen, obwohl eine äußere Störgröße Z vorhanden ist.

Es gilt, eine Regelgröße X (Istwert) durch die Beeinflussung einer Stellgröße Y einer Führungsgröße W (Sollwert) anzugleichen, obwohl eine Störgröße Z vorhanden ist. Aus der scheinbar einfachen Anordnung nach Abb. 7, die auch unter dem Namen 'negatives Feedback' bekannt ist, geht nicht hervor, daß es verschiedene Arten von Reglern gibt, die unterschiedliches Regelverhalten zeigen. In der Klimakammer wird der sogenannte 'Proportionalregler' verwendet, dessen Ausgangssignal Y der Differenz der Eingangssignale W und X proportional ist:

$$Y = A \cdot (W-X) \quad ,$$

wobei der Faktor A eine vorgegebene Verstärkung bezeichnet. Erzwingt das Vorhandensein einer Störgröße Z die Notwendigkeit einer Stellgröße $Y \neq 0$, so bedeutet dies für die vorliegende Regelung eine bleibende Regelabweichung

$$W-X = Y/A \quad ,$$

d.h. der Istwert vermag in diesem Fall dem Sollwert nicht vollständig zu folgen. Weist der Regler eine hohe Verstärkung A auf, so ist die Abweichung gewöhnlich klein und nicht zu bemerken. Der aus

diesem Grunde naheliegenden Forderung, die Verstärkung des Reglers möglichst hoch zu wählen, sind Grenzen gesetzt, wenn man das zeitliche Verhalten des Regelkreises in die Theorie einbezieht. Für die Ausführung eines Reglerbefehls und die Rückmeldung des Ergebnisses sind Verzögerungen anzusetzen, die zur Instabilität des Regelkreises führen können, so daß bei genügend hoher Verstärkung A Oszillationen der Regelgröße X auftreten müssen (1,S.107ff).

Die Regler der Klimakammer sind als elektronische Regler ausgeführt, die sich in einem Schrank neben dem Schaltpult befinden. Die Regelgrößen werden durch die beschriebenen Geber in elektrische Analogsignale umgewandelt und übermittelt, während Magnetventile, Schaltschütze und Thyristoren für die Ausführung der Befehle verantwortlich sind. Eine Erklärung der bei der Klima-Regelung auftretenden Totzeiten läßt sich aus der Beschreibung der Stellglieder und der Meßwertgeber der Klimakammer ableiten (s.Kapitel 2.1.2.).

Bevor die tatsächlich erreichbare Regelung von Kammertemperatur t_K und relativer Luftfeuchte rH beschrieben wird, soll darauf hingewiesen werden, daß es nicht möglich ist, diese Parameter unabhängig

voneinander zu beeinflussen. Da die Temperatur in die Definition der relativen Luftfeuchte eingeht, ist bei gleichbleibender absoluter Feuchte eine Erhöhung von t_K zwangsläufig mit einem Absinken von rH verbunden. Dies ist jedoch kaum jemals von Bedeutung und tritt in der Praxis hinter zwei anderen Effekten zurück.

1 Wenn während der Befeuchtung heißer Dampf in die Kammer eingeblasen wird, steigt t_K um 0,5°C bis 1°C an (bleibende Regelabweichung). Das resultierende Kühlsignal am Temperaturregler kann zu einem überschwingenden Regelverhalten führen, wenn die Befeuchtung beendet ist.

2 Wenn die Kammer gekühlt wird, kann es vorkommen, daß die relative Feuchte rH im Gegensatz zur Theorie nicht ansteigt, sondern fällt. Dieser Effekt ist besonders bei hohen Feuchtewerten zu beobachten und findet seine Erklärung in der Kondenswasserbildung an den Kühlregistern der Klimaschränke. Kommt es dort zur Tropfenbildung, so fließt das Wasser aus dem Versuchsraum und steht nicht mehr zur Verfügung, wenn die Register sich wieder erwärmen.

Nun sollen die Systeme 'Befeuchten-Entfeuchten' und 'Heizen-Kühlen' hinsichtlich ihres Regelverhaltens untersucht werden.

1 Der Feuchteregler steuert mit seinem Ausgangssignal zwei verschiedene Stellglieder. Bei Überschreiten einer eingestellten Schwelle des Befeuchtesignals werden kurz nacheinander durch zwei Schaltschütze die Befeuchtertöpfe eingeschaltet. In diesem Teil wird die proportionale Reglerkennlinie zu einer EIN/AUS-Zweipunktereglung degradiert, die mit einer geringfügigen Hysterese versehen ist.

Fällt ein Entfeuchtesignal an, wird ein proportional reagierendes Magnetventil angesteuert.

Beide Vorgänge sind in Abbildung 8 zu einer 'Reglerkennlinie' zusammengefaßt, die in Verbindung mit der erwähnten Totzeit der Befeuchtung von ca. 15 min dafür verantwortlich ist, daß die Regelung instabil ist und die relative Feuchte abhängig von der Luftbewegung mit einer Amplitude von ca. 10% rH etwa sechs Schwingungen in der Stunde durchläuft.

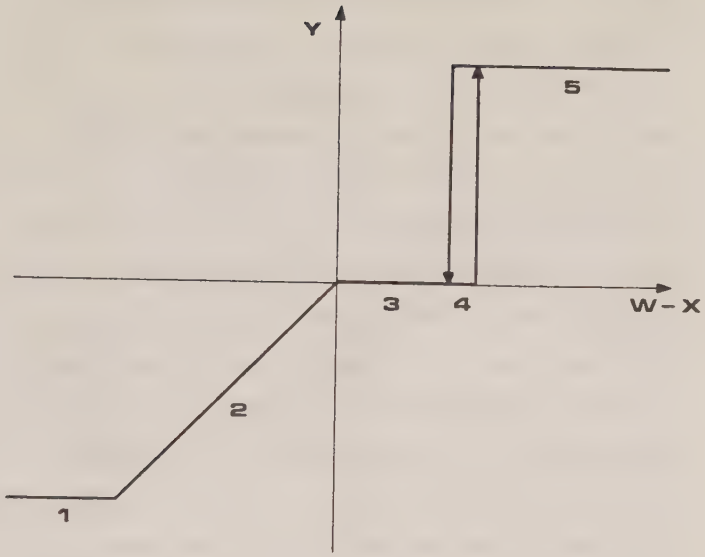

Abb. 8 : Kennlinie des Feuchtereglers

Hierin sollen bedeuten:

W Führungsgröße, d.h. Soll-Feuchte
X Regelgröße, d.h. Ist-Feuchte
Y Stellgröße

1: Entfeuchterventil voll geöffnet
2: proportionaler Bereich des Entfeuchterventils
3: unterschwelliges Signal, Befeuchter AUS
4: Hysterese
5: überschwelliges Signal, Befeuchter EIN

2 Auch bei der Regelung der Kammertemperatur werden je nach dem Vorzeichen der Soll-Ist-Differenz zwei verschiedene Systeme angesteuert, die auf ein gegebenes Reglersignal unterschiedlich reagieren: bei maximaler Ansteuerung erzeugt die Heizung etwa 0,2°C Temperaturdifferenz pro Minute, während der entsprechende Wert für die Kühlung ca. 5°C beträgt. Wegen der Rohrleitungen zum Solebehälter ist das Kühlsystem mit einer Totzeit von ca. 1 min behaftet. Diese Gegebenheiten erklären, warum die Temperaturregelung auf eine Änderung der Führungsgröße W (Solltemperatur) verschieden reagiert, je nachdem, ob geheizt oder gekühlt werden soll. Das Aufheizen erfolgt langsam, aber die Regelung bleibt stabil, während das Kühlen weit über das geforderte Maß hinausgeht. Daß die Temperaturregelung insgesamt nicht oszilliert, ist auf den dämpfenden Einfluß der geringen Verstärkung des Heizsystems zurückzuführen.

Der naheliegende Weg, die Verstärkung des Kühlsystems durch eine Erhöhung der Soletemperatur herabzusetzen, ist nicht gangbar, da hierdurch die Enfeuchtung beeinträchtigt wird (s. 2.1.2.).
Die besprochenen Vorgänge sind in Abbildung 9 veranschaulicht.

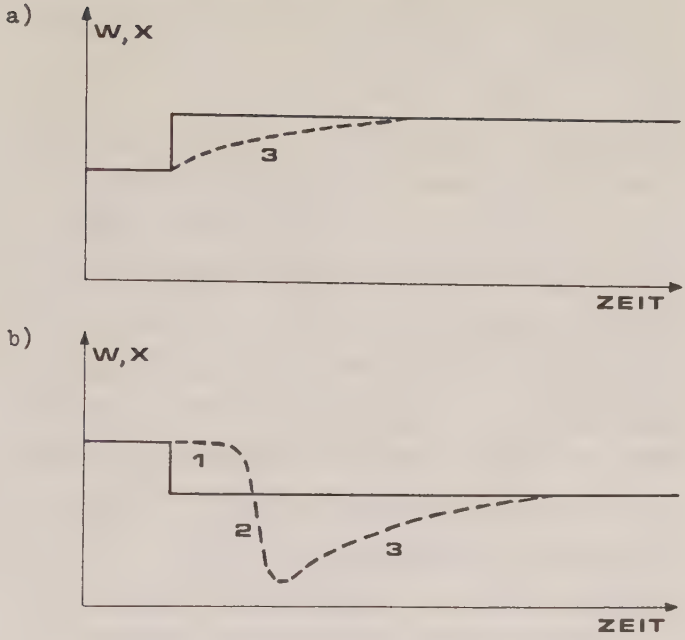

Abb. 9 : Qualitatives Verhalten der Temperaturregelung als Funktion der Zeit

a) Heizen
b) Kühlen

Hierin sollen bedeuten

W: Solltemperatur (durchgezogene Linie)
X: Isttemperatur (gestrichelte Linie)

1: Totzeit durch den Soletransport
2: Phase der schnellen Abkühlung
3: langsames Aufheizen

Aus dem Gesagten ergeben sich praktische Konsequenzen für die Durchführung der Versuchsreihe.

Da sich für die vorliegende Fragestellung die eingebaute Regelung der relativen Luftfeuchte in der Kammer als nicht hinreichend genau erwies, wurde sie abgeschaltet und die Feuchte von Hand gesteuert; jedoch ist auch in diesem Fall die erwähnte Totzeit der Befeuchter nicht zu vermeiden und erschwert das Einstellen bestimmter Feuchtewerte innerhalb einer vorgegebenen Versuchsdauer. Deshalb wurde die Klimakammer jeweils bis zum Versuchsbeginn maximal befeuchtet (ca. 95% rH) und im Versuch die benötigten Feuchtewerte durch Ein- und Ausschalten des Entfeuchteregisters realisiert. Zu diesem Zweck wurde die Führungsgröße auf 0% rH gesetzt und je nach der Anzeige des Aspirationspsychrometers die Regelung ein- und ausgeschaltet. Mit dieser Steuerung von Hand lassen sich vorgegebene Feuchtewerte in monoton fallender Folge auf etwa 5% rH genau einstellen.

Die Regelung der Temperatur ist in der Praxis besser zu verwenden, hier gilt es allerdings, den durch das überschwingende Kühlverhalten erzeugten Temperatursturz und den nachfolgenden Zeit-

verlust für das Aufheizen zu umgehen (vgl. Abb.9). Es stellt sich außerdem heraus, daß im Gleichgewicht, d.h. bei Abwesenheit einer äußeren Störgröße, wenn weder geheizt noch gekühlt wird, eine Totzone der Temperaturregelung von ca. $1^{\circ}C$ existiert. Die Kammertemperatur kann also unter diesen Umständen um $\pm 0,5^{\circ}C$ von der Solltemperatur abweichen, ohne daß die Regelung eingreift. Beide Tatsachen zusammen legen es nahe, den Arbeitspunkt der Temperaturregelung so zu verschieben, daß die Heizung allein die Regelung übernimmt. Diese Auffassung konnte experimentell bestätigt werden: wird am für die Kühlregister zuständigen Magnetventil mit Hilfe eines Handrades ein minimaler Durchfluß unterhalten, so ist damit eine stetige Last für die Heizung erzeugt, die somit gezwungen ist, dauernd zu arbeiten. Bei geeigneter Einstellung lassen sich die Fluktuationen der Kammertemperatur auf $\pm 0,1^{\circ}C$ verringern. Die so modifizierte Regelung ist für die vorliegende Fragestellung genau genug.

Ein Nachteil dieses Vorgehens ist darin zu sehen, daß an den ständig gekühlten Registern Kondenswasser abtropfen kann und so die Kammerfeuchte langsam absinkt. Es gelingt jedoch, den Solefluß so einzustellen, daß dieser Effekt nicht ins Gewicht fällt.

3. Versuchsablauf

Die dieser Arbeit zugrundeliegenden Versuche wurden mit männlichen und weiblichen Versuchspersonen im Alter von 18 Jahren bis 28 Jahren durchgeführt. Jeder einzelnen Versuchsperson wurde in einer Vorbesprechung in groben Zügen die Durchführung des Experimentes skizziert und das Versprechen abverlangt, am Versuchstage morgens nicht zu frühstücken. War der Versuchsbeginn auf den Nachmittag festgesetzt, wurde eine vorherige sechstündige Nahrungskarenz verabredet. Während des Versuches war das Rauchen oder Essen nicht gestattet. Es machte niemand von dem Angebot Gebrauch, gegen evtl. auftretenden Durst in der Kammer temperiertes Wasser zu trinken.

Vor Versuchsbeginn danach befragt, gaben alle Personen an, sich gesund zu fühlen und an keiner Erkältungskrankheit o.ä. zu leiden. An persönlichen Daten der Versuchspersonen wurde neben dem Namen das Gewicht, die Körpergröße, das Alter und bei Frauen der Tag des Menstruationszyklus protokolliert.

Da nicht informierte Personen ihre Behaglichkeitstemperatur fast stets um einige ^{o}C zu niedrig schätzen (4,S.81), wurden den Versuchspersonen

Auskünfte über Temperatur und Feuchte verwehrt, um sie nicht zu beeinflussen.

Der subjektive thermische Eindruck der Versuchspersonen wurde in Anlehnung an frühere Untersuchungen im amerikanischen Raum (4,S.74) mit Hilfe von sieben Zahlen festgehalten, denen jeweils eine Empfindung zugeordnet war. Die folgende Aufstellung befand sich während der Versuche deutlich sichtbar im Blickfeld der Versuchspersonen.

1 zu kalt
2 zu kühl
3 etwas zu kühl
4 behaglich
5 etwas zu warm
6 zu warm
7 zu heiß

Alle Versuchspersonen wurden zum einen aufgefordert, auch kleine Abweichungen von der thermischen Behaglichkeit zu bekunden, zum anderen aber gebeten, nur die Zahl zu nennen, die ihrer thermischen Empfindung am nächsten kam und weitergehende Bewertungen zu unterlassen. Es wurde verabredet, daß die Versuchsperson sich jedesmal auf ein

akustisches Signal hin äußern solle. Um sie nicht zu beeinflussen, wurde ein eventueller Blickkontakt vorher unterbrochen und keine Reaktion auf die jeweils gerade genannte Zahl gezeigt. Wie schon in Abschnitt 2.1.1. zum Ausdruck gebracht wurde, ist es bei geeigneter Sitzposition des Versuchsleiters am Schaltpult möglich, die Klimabedingungen in der Kammer zu verändern, ohne daß die Versuchsperson dies beobachten kann.

Vor jedem Versuch von ca. 4 Stunden Dauer wurde die Klimakammer auf ca. 95% rH befeuchtet und die Regelung kurz vor Versuchsbeginn ausgeschaltet, um die Versuchsperson nicht durch das Geräusch des eingeblasenen Dampfes zu beeinflussen. In einem nahegelegenen Raum zog die Versuchsperson eine Badehose bzw. einen Bikini an, deren thermische Isolationswerte näherungsweise mit 0 clo anzusetzen sind (4,S.33). Den Weg zum Versuchsraum legte die Versuchsperson in einen dünnen Baumwollmantel gehüllt zurück, um in der für diese Kleidung relativ zu kalten Raumtemperatur nicht zu frieren. Nach Betreten der Kammer wurde der Baumwollstoff dazu benutzt, die Sitzfläche und die Rückenlehne des verwendeten Stuhles auszulegen, um zu verhindern, daß durch den direkten Kontakt mit der Kunststoff-

oberfläche unangenehme Empfindungen wie 'Schwitzen', 'Kleben' o.ä. ausgelöst wurden. Bei dieser Maßnahme wurde darauf geachtet, die Luftzirkulation um den Körper herum nicht zu behindern und die Versuchsperson gegebenenfalls aufgefordert, die Anordnung zu korrigieren. Die meisten Versuchspersonen benutzten einen bereitgestellten Schemel, um die Füße darauf abzulegen.

Bis auf gelegentliche Veränderungen der Sitzposition waren keine körperlichen Aktivitäten gestattet, viele Versuchspersonen machten jedoch von dem Angebot Gebrauch, in einem mitgebrachten Buch zu lesen.

Die klimatische Ausgangssituation war mit ca. 27°C und ca. 90% rH so gewählt, daß sie für gewöhnlich als zu kühl beurteilt wurde. Die durch die hohe Luftfeuchte erfolgende Kondensation an der Hautoberfläche kann allerdings kurzzeitig zu einer erhöhten Wärmeempfindung führen (8), weshalb die Versuchspersonen nach Betreten der Kammer angewiesen wurden, sich vorläufig nicht zu ihrer Klimaempfindung zu äußern, sondern die entsprechende Aufforderung abzuwarten.

Die Ventilatoren der Luftumwälzung wurden so

eingestellt, daß die mittlere Luftgeschwindigkeit, der die Versuchsperson ausgesetzt war, 50 cm/s betrug. Diese Einstellung wirkt sich auf das Temperaturverhalten der Kammer günstig aus und liegt nach bisherigen Erkenntnissen (4,S.48ff) in einem Bereich, in dem sich kleine Abweichungen der Luftgeschwindigkeit nur geringfügig auf die Behaglichkeitstemperatur auswirken.

Etwa 20 min nach Versuchsbeginn begannen die Versuchspersonen, in etwa dreiminütigen Abständen ihr thermisches Empfinden auf ein akustisches Signal hin zu bekunden. Erst wenn durch mehrere gleichartige Äußerungen die sichere Einordnung des Klimas möglich war, wurden die äußeren Bedingungen geändert. War durch hinreichend viele Angaben sichergestellt, daß die Kammertemperatur unter der Behaglichkeitstemperatur lag, wurde die Kammer in Schritten von ca. 0,2°C langsam erwärmt, bis die thermische Behaglichkeit erreicht war, und danach weiter geheizt, bis schließlich alle Angaben auf die Situation 'zu warm' hindeuteten. Dann wurde die Temperatur wieder reduziert, die Feuchte in einen tieferen Bereich gebracht und erneut eine Ausgleichszeit von ca. 20 min bis zum Einstellen

eines neuen thermischen Gleichgewichtes abgewartet. Damit die Versuchspersonen aus dem Ablauf keine Rückschlüsse auf die Veränderung der klimatischen Bedingungen ziehen konnten, wurden auch während des Entfeuchtens und der Ausgleichszeit regelmäßige Äußerungen zum thermischen Empfinden verlangt, ohne jedoch in die Versuchsauswertung einzugehen.

Die Versuche wurden beendet, wenn bei ca. 25% rH die untere Feuchtegrenze der Kammer erreicht war.

4. Versuchsauswertung

Während jeden Versuches wurden die Äußerungen der Versuchspersonen zur thermischen Situation zeilenweise protokolliert mit Uhrzeit, Kammertemperatur, relativer Luftfeuchte, thermischem Votum und evtl. einer Bemerkung über eine vorangegangene Entfeuchtung, Abkühlung oder sonstige Störung des klimatischen Gleichgewichtes in der Kammer. Dies ermöglichte es, nach Abschluß der Versuche die Werte zu erkennen, die von der Auswertung ausgeschlossen werden sollten (s.Abschnitt 3.). Auf diese Weise erbrachte jeder Versuch beim einzelnen Probanden etwa 40 bis 50 Daten, von denen angenommen werden darf, daß sie unter Gleichgewichtsbedingungen ermittelt worden sind. Mit 'Daten' sind hier auf die entsprechende Versuchsperson bezogene Zahlentripel aus Kammertemperatur t_K, relativer Luftfeuchte rH und thermischem Votum v gemeint:

$$(t_K , rH , v) \quad .$$

Gemäß der Auffassung, daß unter konstanten anderen äußeren Bedingungen und sonstigen Parametern (Bekleidung, Aktivitätsniveau u.a.) für jede Person durch die Angabe von t_K und rH eine thermische

Sensation v festgelegt ist, kann man eine Zuordnung

$$(t_K , rH) \longrightarrow (v)$$

postulieren und annehmen, daß die festgestellten Daten diese Gesetzmäßigkeit an bestimmten Stellen repräsentieren. An den Stellen, an denen die Meß-Daten hinreichend dicht liegen, darf man so auf den lokalen Verlauf dieser Zuordnung schließen.

Es liegt nahe, die Zahlenpaare (t_K,rH) in einer Temperatur-Feuchte-Ebene anzuordnen, in die dann jedes einzelne Votum einer Versuchsperson an den zugehörigen Platz als Zahl oder graphisches Symbol eingetragen wird. Anschließend kann man versuchen, aus dieser Graphik Schlüsse auf Behaglichkeits-bereiche und -grenzen zu ziehen. Dieses naheliegende Verfahren ist jedoch mit Nachteilen behaftet, da zum einen das Erkennen von zweidimensionalen Mustern aus nur ca. 50 Punkten schwerfällt, zum anderen die Zuordnung $(t_K,rH) \longrightarrow (v)$ in der Praxis störenden Einflüssen ausgesetzt ist. Als mögliche Fehler-quellen sind hier eine Reihe von Ursachen denkbar, z.B. Fluktuationen des thermischen Empfindens, Unaufmerksamkeit oder Fehlaussagen der Versuchs-

person, unerkannte Störungen des thermischen Gleichgewichtes der Kammer u.a.

Aus diesen Gründen wurde bei der Auswertung der Versuchsergebnisse ein anderer Weg eingeschlagen. Da es bei der vorliegenden Fragestellung mehr auf die Veränderung der Behaglichkeitstemperatur in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte als auf ihre absolute Lage ankommt, wurde auf eine individuelle Auswertung für jede einzelne Versuchsperson zunächst verzichtet und statt dessen wie folgt verfahren.

Es wird angenommen, daß die Temperatur, bei der sich ein Mensch behaglich fühlt, einen individuellen Term enthält, der von der Luftfeuchte nicht abhängt, sowie einen feuchteabhängigen Beitrag, der für alle Personen gleichartig sein soll. Durch diesen Ansatz ist es zu erklären, warum z.B. Versuchsperson 1 sich bei 90% rH und 30°C behaglich fühlt, während Versuchsperson 2 hier 31°C bevorzugt, obwohl die sonstigen klimatischen Bedingungen gleich sind.

Die obige Annahme läßt sich mathematisch formulieren als

$$(-1-) \qquad t = F_i^*(rH) = f(rH) + T_i \qquad i = 1,\ldots,20$$

Hierin sollen bedeuten

t : Behaglichkeitstemperatur

rH : rel. Luftfeuchte, $0 \leq rH \leq 1$

T_i : 'Individualtemperatur', d.h. individueller Beitrag zur Behaglichkeitstemperatur

$f(rH)$: genereller, feuchteabhängiger Beitrag zur Behaglichkeitstemp.

Da in der Gleichung (-1-) die Temperaturen T_i, bzw. die Funktion $f(rH)$ nur bis auf eine additive Konstante bestimmt sind, ist es statthaft, die Festsetzung

$$(-2-) \qquad f(0,9) = 0$$

zu treffen. Damit erhält man eine weitere Gleichung

$$(-3-) \qquad T_i = F_i^*(0,9) \quad ; \quad i = 1,\ldots,20 \quad .$$

Diese Vereinbarung bedeutet, daß als individueller

Beitrag zur Behaglichkeitstemperatur ihr entsprechender Wert bei 90% relativer Feuchte zu verstehen ist. Die Wahl dieses Feuchteniveaus wird durch die experimentellen Gegebenheiten erklärt (s.Kapitel 2.2. und 3.).

Die Kenntnis der Temperaturen T_i ermöglicht nun die Definition einer 'Konvergenztemperatur' T_K :

$$(-4-) \qquad T_K = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} T_i$$

und der 'Korrekturtemperaturen' ΔT_i:

$$(-5-) \qquad \Delta T_i = T_K - T_i \qquad i=1,\ldots,20 \quad ,$$

die angeben, inwieweit sich die Individualtemperatur einer Versuchsperson von der Konvergenztemperatur unterscheidet.

Die bisherigen Überlegungen münden nun in der Definition der Größen

$$(-6-) \qquad F_i(rH) = F_i^*(rH) + \Delta T_i \quad , \quad i = 1,\ldots,20 \quad ,$$

die nur noch scheinbar vom Index der Versuchsperson abhängen. Setzt man nämlich (-1-) und (-5-) in die Gleichung (-6-) ein, so ist zu verifizieren,

daß alle Funktionen $F_i(rH)$ identisch sind. Die einfache Festsetzung

(-7-) $$F(rH) = F_1(rH)$$

gestattet daher, auf den Index hinfort zu verzichten und als 'Behaglichkeitsfunktion' die Größe

(-8-) $$F(rH) = f(rH) + T_K$$

zu bezeichnen.

Durch diese grundlegenden Berechnungen wird erreicht, daß die Daten aller Versuchspersonen miteinander vergleichbar werden und zur Ermittlung des Verlaufes der Behaglichkeitsfunktion in ihrer Gesamtheit zur Verfügung stehen.

Um die anstehenden Operationen mühelos durchführen zu können und die Versuchsauswertung auch im Hinblick auf später auftretende Fragestellungen zu vereinfachen, wurden alle Daten mit Hilfe von Lochkarten codiert und ein FORTRAN-Programm für den Rechner TELEFUNKEN TR 445 des Rechenzentrums der Universität Düsseldorf erstellt. Dieses Programm, dessen Flußdiagramm in Abbildung 10 in groben Zügen dargestellt ist, besorgt die Verarbeitung der Daten und den Ausdruck der berechneten Werte.

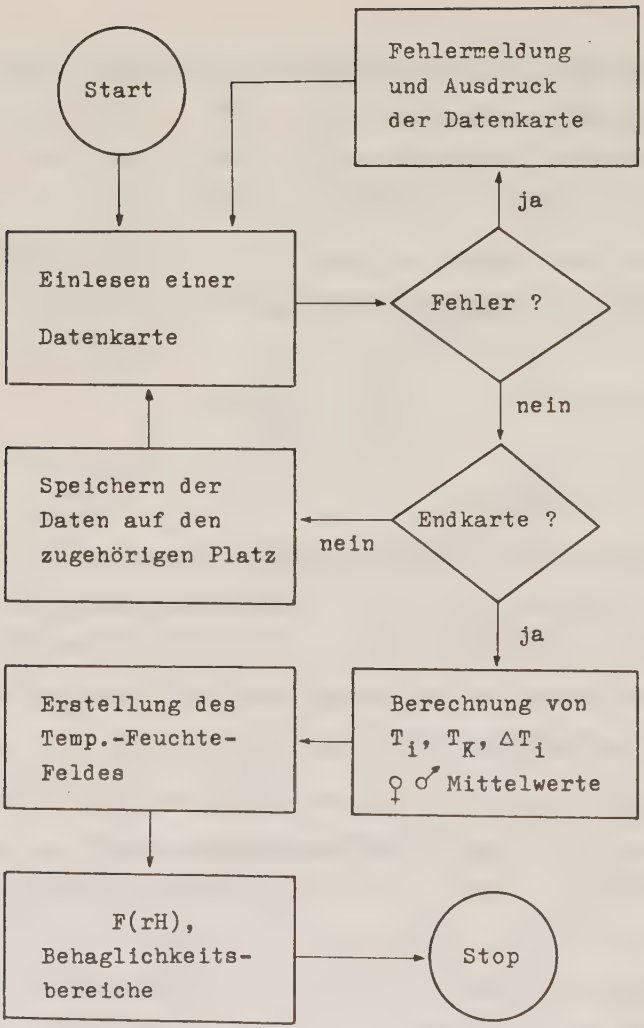

Abb. 10 : Flußdiagramm des FORTRAN-Programmes
Das vollständige Programm ist im Anhang (Abschnitt 8.) aufgelistet.

Da die Bestimmung der Individualtemperaturen T_i an die vorliegenden Daten gebunden ist, konnte der in Gleichung (-3-) angestrebte Wert von rH = 90% in praxi nur näherungsweise erreicht werden. Die mittlere Abweichung hiervon betrug jedoch nur 3% rH und ist damit zu klein, um von Bedeutung zu sein.

Das Ergebnis der besprochenen Operationen ist ein Temperatur-Feuchte-Feld, das die Klimabewertungen aller Versuchspersonen enthält. Hierin ist die Temperatur in $0{,}2^{\circ}C$-, die relative Feuchte in 5% - Schritten aufgezeichnet. Die gemittelten Vota wurden auf zwei Dezimalen hinter dem Komma genau gespeichert. Die in der Gleichung (-8-) geforderte Behaglichkeitsfunktion erscheint nun als ein wechselnd breites Band im Temperatur-Feuchte-Feld, in dem sich die Wertungen um v = 4 häufen und es ist die Aufgabe des FORTRAN-Programmes, hieraus wesentliche Informationen über den Verlauf von F(rH) zu gewinnen.

Es wurde beschlossen, alle Vota zwischen v = 3,5 und v = 4,5 als einem 'praktischen Behaglichkeitsbereich' zugehörig zu erklären. Damit ermittelt sich die Funktion F(rH) wie folgt:

$$(-9-) \qquad F(rH_i) = \frac{1}{N_i} \sum_{k=1}^{N_i} t_k \quad ,$$

wobei zur Summation alle Temperaturen t_k zugelassen werden, die die nachstehenden Bedingungen gleichzeitig erfüllen:

$$(-10-) \qquad 3{,}5 \leq v(t_k, rH_j) \leq 4{,}5 \qquad \text{mit}$$

$$(-11-) \qquad i-1 \leq j \leq i+1 \quad , \quad i=6,\ldots,18 \qquad \text{und}$$

$$(-12-) \qquad rH_j = 0{,}05 \cdot j \quad .$$

Hierin legt Gleichung (-9-) fest, daß über alle Temperaturen t_k gemittelt werden soll, die als 'praktisch behaglich' (Ungleichung (-10-)) empfunden wurden.

Die Bedeutung der Gleichungen (-11-) und (-12-) sei an einem Beispiel demonstriert. Für i = 6 in (-11-) werden durch (-12-) die Feuchteniveaus rH = 25%, 30% und 35% zur Temperaturbestimmung herangezogen. Bedenkt man nun, daß im 5%-Feuchteraster unter rH = 25% alle Werte von 22,5% bis 27,5% gespeichert sind, so lassen die genannten Gleichungen alle Feuchtewerte von 22,5% bis 37,5%

zur Temperaturbestimmung zu.

Die Gleichungen (-11-) und (-12-) bewirken also eine zusätzliche Integration über einen Bereich von 15% und sichern damit, daß für jede Feuchte eine genügend große Anzahl N_i von Werten in die Berechnung nach Gleichung (-9-) eingeht.

Dem Raster der Eingangsdaten entsprechend steht die Funktion F(rH) von rH = 30% bis rH = 90% in Schritten von 5% zur Verfügung.

5. Ergebnisse und Diskussion

5.1. Erstellung der Behaglichkeitsfunktion

Es sollen nun die Ergebnisse der Versuche zur Sprache kommen und auf ihre Aussagen hin untersucht werden. Dabei ist besonders zu berücksichtigen, daß wegen der geringen Anzahl von Versuchspersonen (N = 20) eine Mittelwertbildung nach dem in Abschnitt 4. beschriebenen Verfahren durchgeführt worden ist.

In Tabelle 1 ist ersichtlich, wie weit die einzelnen Individualtemperaturen T_i von der Konvergenztemperatur T_K abweichen, und es sind die persönlichen Daten der Versuchspersonen aufgezeichnet.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	63	174	0,229	18	--	28,92	-0,08
2	0	53	165	0,228	28	5	28,44	-0,56
3	1	65	168	0,239	28	--	29,34	0,34
4	0	57	165	0,233	24	8	29,80	0,80
5	0	57	170	0,226	28	25	30,22	1,22
6	1	83	194	0,225	23	--	31,40	2,40
7	0	51	167	0,222	23	20	32,01	3,01
8	0	62	174	0,227	23	1	29,24	0,24
9	1	76	176	0,241	28	--	28,87	-0,13
10	0	53	164	0,229	26	25	31,30	2,30
11	0	58	167	0,232	28	16	30,67	1,67
12	1	72	176	0,236	23	--	24,97	-4,03
13	0	65	173	0,232	22	21	28,51	-0,49
14	1	70	178	0,232	23	--	27,54	-1,46
15	0	51	165	0,225	20	30	26,93	-2,07
16	0	60	173	0,226	27	14	27,26	-1,74
17	0	50	164	0,225	26	10	29,80	0,80
18	1	79	178	0,241	26	--	27,25	-1,75
19	1	78	178	0,240	25	--	27,64	-1,36
20	1	75	178	0,237	28	--	29,93	0,93

Tab. 1 : Persönliche Daten und Individualtemperaturen der Versuchspersonen

1: Nr. der Versuchsperson
2: Geschlecht; 0 = weiblich, 1 = männlich
3: Körpergewicht in kp
4: Körpergröße in cm
5: ponderal index, $kp^{0,33}/m$, s.Text
6: Alter in Jahren
7: Tag des Menstruationszyklus
8: Individualtemperatur T_i in ^{o}C
9: Abweichung von $T_K = 29,00^{o}C$

Die im vorangehenden Abschnitt 4. definierte Behaglichkeitsfunktion F(rH) ist in Tabelle 2 als Wertetafel aufgezeichnet, wobei sich der zur Verfügung stehende Feuchtebereich mit den experimentellen Möglichkeiten der Klimakammer deckt .

1	2	3	4	5
30	30,81	57	2,12	0,28
35	30,58	52	2,18	0,30
40	30,56	27	1,60	0,31
45	30,47	19	1,13	0,26
50	30,29	32	2,02	0,36
55	29,98	42	1,94	0,30
60	29,75	39	1,92	0,31
65	29,60	23	1,33	0,28
70	29,54	16	1,19	0,30
75	29,31	17	1,13	0,27
80	29,19	25	1,07	0,21
85	29,12	26	0,93	0,18
90	29,07	30	0,87	0,16

Tab. 2 : Wertetafel der Behaglichkeitsfunktion F(rH) im Feuchteraster von rH = 30% bis rH = 90%

1: relative Feuchte rH in %
2: Behaglichkeitstemperatur in ^{o}C
3: Anzahl N_i der Temperaturen, die in die Mittelwertbildung eingehen (vgl. Gleichung (-9-) in Kapitel 4.)
4: Standardabweichung der Temperaturen in ^{o}C
5: Standardabweichung des Mittelwertes $s_{\bar{x}}$ in ^{o}C

Es ist festzustellen, daß unter den gegebenen klimatischen Bedingungen die Temperatur um 1,74°C gesenkt werden muß, damit die thermische Behaglichkeit erhalten bleibt, wenn man die relative Luftfeuchte von 30% auf 90% heraufsetzt.

In den Spalten 3, 4 und 5 von Tabelle 2 finden sich Informationen darüber, wieviele Werte gemäß den Gleichungen (-9-) bis (-12-) in die Mittelwertbildung für F(rH) eingegangen sind, die Standardabweichungen s der Temperaturen und die jeweilige Standardabweichung $s_{\bar{x}}$ des Mittelwertes. Durch die Bestimmung von F(rH) ist es verständlich, daß in der Nähe von rH = 90% die Größen s und $s_{\bar{x}}$ relativ klein werden, da dieses Feuchteniveau dazu benutzt wurde, die Behaglichkeitstemperaturen der einzelnen Versuchspersonen zu standardisieren.

Wenn es auch aus diesem Grunde nicht zulässig ist, die Standardabweichungen s der Temperaturen als ein direktes Maß für die Breite des thermischen Behaglichkeitsbereiches anzusehen, fällt es doch ins Auge, welch große Ausdehnung der Bereich i.a. hat, der die vota zwischen v = 3,5 und v = 4,5 enthält. Dies legt, vereinfacht gesagt, den Schluß nahe, daß der Einfluß der relativen Luftfeuchte auf die thermische Behaglichkeit gering ist und leicht hinter anderen

Effekten zurücktritt: für die meisten in Tabelle 2 angegebenen Feuchteniveaus ist die einfache Standardabweichung s der Temperaturen größer als die zu fordernde Absenkung der Temperatur beim Sprung von 30% rH nach 90% rH. Es wäre die Aufgabe einer weiteren Untersuchung, die hierin begründete methodische Schwierigkeit durch eine größere Anzahl von Probanden zu umgehen.

Um auch außerhalb des 5%-Feuchterasters eine Information über den Verlauf von F(rH) bereitzuhalten, wurde diese Funktion durch einen linearen Ansatz

$$\hat{F}(rH) = a + b \cdot rH \qquad (-13-)$$

approximiert. Die Werte der Konstanten a und b wurden durch die Forderung bestimmt, daß die Summe der Fehlerquadrate zwischen $\hat{F}(rH)$ und F(rH) minimal werde, d.h.

$$\sum \left(\hat{F}(rH) - F(rH) \right)^2 = \text{min!} \qquad (-14-)$$

$$rH = 0{,}3;\ldots;0{,}9 \quad .$$

Die in Gleichung (-14-) formulierte Bedingung entspricht der Suche nach der besten Approximation zu

einer gegebenen Funktion. Nach Lösen eines linearen Gleichungssystems erhält man auf diese Weise eine eindeutig bestimmte Bestgerade, deren Gleichung (mit gerundeten Koeffizienten) lautet:

$$(-15-) \qquad \hat{F}(rH) = 31{,}75^{\circ}C - 3{,}14^{\circ}C \cdot rH \quad .$$

Diese Näherung weicht von der Behaglichkeitsfunktion an keiner Stelle um mehr als $0{,}15^{\circ}C$ ab und approximiert somit F(rH) sehr genau, wenn man die experimentellen Gegebenheiten und die Größe der möglichen Meßfehler im Auge behält (s. die Abschnitte 2.1.3. und 2.2.). Darüber hinaus ist $\hat{F}(rH)$ für alle relativen Feuchten von 0% bis 100% definiert. Bei der Benutzung von Gleichung (-15-) ist indessen zu beachten, daß eine gute Übereinstimmung mit F(rH) nur im Bereich von rH = 30% bis rH = 90% experimentell abgesichert ist und nicht a priori angenommen werden darf, daß der lineare Ansatz auch außerhalb dieser Grenzen hinreichend genau sei.
In Abbildung 11 sind die Behaglichkeitsfunktion F(rH) und ihre lineare Approximation $\hat{F}(rH)$ wiedergegeben, außerdem sind die mittleren Fehler $s_{\bar{x}}$ der Mittelwerte nach Tabelle 2 eingezeichnet. Oberhalb und unterhalb davon befinden sich zwei aus Geradenstücken zusammengesetzte Linien, deren Bedeutung im folgenden erklärt wird.

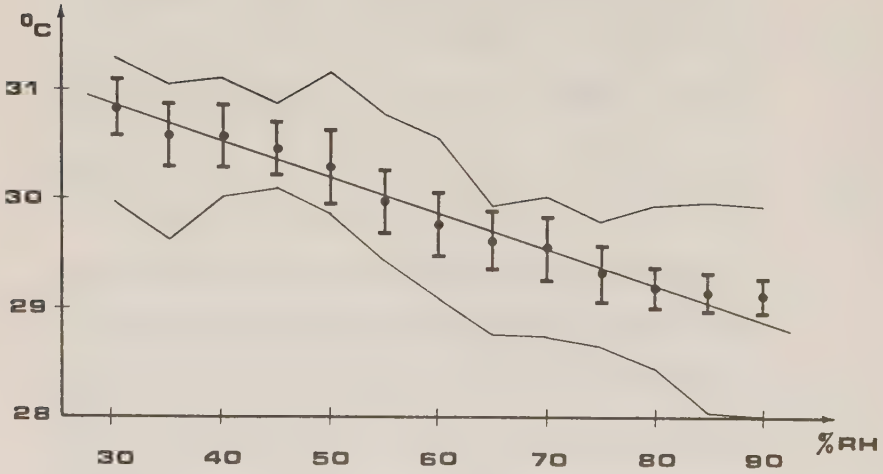

Abb. 11 : Die Behaglichkeitsfunktion
$F(rH)$ [••••]
und ihre lineare Approximation
$\hat{F}(rH)$ [————] .

Als vertikale Balken sind die Standardabweichungen $\pm s_{\bar{x}}$ der Mittelwerte eingetragen, die $F(rH)$ erzeugen.

Der 'weitere Behaglichkeitsbereich' (s. Text) wird durch die darüber- und darunterliegenden Linienzüge begrenzt.

5.2. Behaglichkeitsbereiche und geschlechtsspezifische Einflüsse

Um eine Information zu gewinnen, wie unter den experimentellen Bedingungen ein Klima zu beurteilen sei, das vom Optimum der thermischen Behaglichkeit abweicht, wurde versucht, eine Funktion ähnlich wie F(rH) nach den Gleichungen (-9-) bis (-12-) zu erklären. Für die Empfindung 'etwas zu kühl' wurden so in Gleichung (-10-) die Grenzen ersetzt durch

$$3 \leq v(t, rH) \leq 4$$

und für 'etwas zu warm' durch

$$4 \leq v(t, rH) \leq 5 \quad .$$

Die solchermaßen ermittelten diskreten Funktionswerte wurden zur Veranschaulichung durch Geradenstücke verbunden und in Abbildung 11 eingetragen. Der Analyse eines so festgelegten 'weiteren Behaglichkeitsbereiches' sind jedoch durch die Art des Versuchsablaufes (s.Abschnitt 3.) Grenzen gesetzt, da die einzelnen Versuche ja darauf abzielten, die Versuchsperson im Zustand der thermischen Behaglichkeit zu halten. Somit stehen für diese zusätzliche Information zu wenig Meßpunkte zur Verfügung, was

sich auch in der Tatsache ausdrückt, daß die berechneten Funktionen mit steigender Feuchte nicht monoton fallen, wie man es erwarten sollte.

Zusammenfassend kann man sagen, daß aus der vorliegenden Untersuchung nicht geschlossen werden kann, daß sich die Breite des thermischen Behaglichkeitsbereiches mit der Feuchte signifikant ändert.

Obwohl die jetzige Versuchsserie in erster Linie dazu ausgelegt war, die Rolle der Luftfeuchte für das Konzept der thermischen Behaglichkeit zu analysieren, kann man versuchen, anhand von Tabelle 1 die Einflüsse anderer Parameter auf die Individualtemperaturen T_i zu studieren. Eine diesbezügliche Interpretation hat jedoch auf die geringe Anzahl der Probanden Rücksicht zu nehmen und es muß dahingestellt bleiben, ob eine beobachtete Tendenz sich auch bei einer größeren Anzahl von Versuchspersonen und unter anderen Versuchsbedingungen bestätigt.

Das Kollektiv der Teilnehmer bestand aus neun männlichen und elf weiblichen gesunden Hochschulstudenten im Alter von 18 Jahren bis 28 Jahren. Bezüglich des Alters und auch des Körperbaues, bzw. des in diesem Zusammenhang häufig benutzten 'ponderal index' (4,S.88; s.auch Tab. 1) ist die Variation in

diesem Kreis naturgemäß zu gering, um Aussagen hinsichtlich der Individualtemperaturen ableiten zu können.

Deutlich hingegen ist der Einfluß des Geschlechtes: unter den gegebenen experimentellen Bedingungen bevorzugten weibliche Versuchspersonen Temperaturen, die im Mittel um 1,04°C höher lagen als die ihrer männlichen Kollegen. Unterteilt man noch weiter, so ist festzustellen, daß diese Differenz hauptsächlich von den weiblichen Probanden erzeugt wird, die sich in der zweiten Hälfte ihres Menstruationszyklus befanden (d > 14.Tag). Eine mögliche Interpretation dieses Sachverhaltes ist jedoch neben der geringen Größe der Stichprobe dadurch belastet, daß im gegebenen Kollektiv wahrscheinlich eine hormonelle Kontrazeption erfolgte und eine Befragung hierzu nicht durchgeführt wurde. In Tabelle 3 sind die besprochenen Mittelwerte der Individualtemperaturen aufgeführt.

29,00°C (N=20)	
28,43°C (N=9)	29,47°C (N=11)
♂	28,91°C (N=5) d ≤ 14.Tag | 29,94°C (N=6) d > 14.Tag
	♀

Tab. 3 : Geschlechtsspezifische Mittelwerte der Individualtemperaturen (rH = 90%)

5.3. Vergleich mit der Literatur

Will man die gewonnenen Ergebnisse mit denen anderer Autoren vergleichen, stößt man auf eine Schwierigkeit, die darin begründet ist, daß eine Vielzahl von Parametern in das thermische Empfinden eingehen. Die Unmenge der Möglichkeiten, diese Variablen zu einem Klima zu kombinieren, hat zu der Situation geführt, daß von den bekannten Versuchen (s. Lit. in (7,S.604)) kaum jemals einer dem anderen gleicht und aus diesem Grunde die Versuchsergebnisse vielfach isoliert dastehen.

Vor diesem Hintergrund ist die Leistung von FANGER (4) darin zu sehen, im Jahre 1970 die Resultate eigener Versuche und theoretischer Überlegungen zu einer einzigen 'Behaglichkeitsgleichung' verbunden zu haben. Sie soll erlauben, Kombinationen von Klimaelementen zu ermitteln, die die Empfindung der thermischen Behaglichkeit versprechen.

Da die Gleichung selbst relativ komplex ist, werden in (4) graphische Lösungen für bestimmte Sonderfälle angeboten. Außerdem finden sich in tabellarischer Form Informationen darüber, wie ein Klima zu beurteilen sei, das vom Optimum der Behaglichkeit abweicht (4,S.107ff). Die angesprochenen Tabellen erfassen

jedoch nicht alle Fälle, und auch speziell zur jetzt durchgeführten Versuchsserie läßt sich nichts daraus ablesen. Ein graphischer Vergleich ist hingegen möglich, da der aktuelle Versuch Bedingungen aufwies, die in (4,S.44) dokumentiert sind und die noch einmal dargelegt werden sollen: es handelt sich um ruhig sitzende, fast unbekleidete Probanden, die sich in einer Umgebung befinden, deren mittlere Strahlungstemperatur der Temperatur der mit v = 0,5m/s anströmenden Luft entspricht. Abbildung 12 stellt die jetzigen Ergebnisse denen gegenüber, die von FANGERs Behaglichkeitsgleichung (4,S.42) vorausgesagt werden.

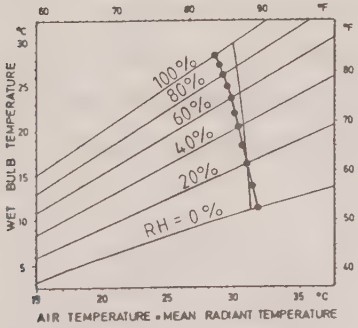

Abb. 12 : Behaglichkeitstemperatur als Funktion der relativen Luftfeuchte. Ein Vergleich der jetzigen Ergebnisse mit den Voraussagen von FANGER. v = 0,5 m/s

(——) nach (4,S.44) FANGER
(•••••) nach Gleichung (-15-) aus Kap. 5.1.

Es fällt ins Auge, daß für geringe Feuchten die die Übereinstimmung mit FANGERs Behaglichkeitsgleichung gut ist, während die Ergebnisse bei höheren Feuchten divergieren: die Behaglichkeitstemperatur hängt in der durchgeführten Versuchsserie stärker von der Luftfeuchte ab, als dies von der Behaglichkeitsgleichung (4,S.42) vorausgesagt wird. Bei 90% relativer Feuchte beträgt die Differenz ca. 1°C und liegt damit in einer nicht mehr zu vernachlässigenden Größenordnung.

An dieser Stelle ist es erwähnenswert, daß die in (4) erstellte Gleichung in der Theorie zwar für alle möglichen Klimaparameter Aussagen liefert, eine experimentelle Überprüfung der Ergebnisse jedoch nur für einige Sonderfälle durchgeführt worden ist (4,S.68ff). Daher ist in Frage zu stellen, ob die von FANGER vorausgesagte Feuchteabhängigkeit der Behaglichkeitstemperatur allgemeine Gültigkeit besitzt.

Zusammenfassend ist also Folgendes zu sagen:
Trotz der experimentellen und methodischen Beschränkungen dieser Arbeit konnte festgestellt werden, daß die Feuchteabhängigkeit der Behaglichkeitstemperatur unter den gewählten Versuchsbedingungen stärker ist als von FANGER (4,S.60) vorausgesagt wurde. Mit dem

absoluten Wasserdampfdruck p_a als Variable findet sich dort ein Wert der partiellen Ableitung der Behaglichkeitstemperatur nach p_a der Größe

$$\frac{\partial t}{\partial p_a} = -0{,}04 \frac{^{o}C}{mmHg} \quad ,$$

während das Ergebnis der jetzigen Versuche nach Gleichung (-15-) lautet

$$\frac{\partial t}{\partial p_a} = -3{,}14 \frac{^{o}C}{31{,}8\ mmHg} = -0{,}10 \frac{^{o}C}{mmHg} \quad ,$$

wenn man berücksichtigt, daß bei 30°C 100% rH einem Wasserdampfdruck von p_a = 31,8 mmHg entsprechen (15,S.262).

Sieht man von dieser numerischen Differenz ab, so bestätigte sich die Aussage, daß die relative Luftfeuchte auf die thermische Behaglichkeit einen nur geringen Einfluß hat und im Vergleich zu anderen Parametern eine untergeordnete Rolle spielt. Aus der Sicht der thermischen Behaglichkeit besteht kein Grund, in einem künstlich geschaffenen Klima hohe oder niedrige Feuchten zu bevorzugen, und es sind andere als thermische Effekte der Luftfeuchte, die von Extremen abraten lassen.

6. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht die Abhängigkeit der als behaglich empfundenen Umgebungstemperatur von der relativen Luftfeuchte.

Die Möglichkeiten einer für diese Aufgabe zur Verfügung stehenden Klimakammer wurden analysiert und daraus Konsequenzen für den Ablauf einer Versuchsserie hergeleitet.

Die Ergebnisse wurden mit Hilfe eines hierzu entwickelten Verfahrens standardisiert, das mittels eines FORTRAN-Programmes auf einem Großrechner durchgeführt wurde.

Es wurde gezeigt, daß der Einfluß der Luftfeuchte auf die thermische Behaglichkeit größer ist, als nach bisherigen Ergebnissen zu erwarten gewesen wäre, jedoch im Vergleich zu anderen Klimaelementen auf die thermische Behaglichkeit insgesamt einen nur geringen Einfluß hat.

7. Literaturverzeichnis

(1) L.MERZ, Grundkurs der Regelungstechnik, 6. Auflage, R.Oldenbourg Verlag, München-Wien 1976

(2) G.PRESSLER, Regelungstechnik, 1. Band, 3. Auflage, BI-Hochschultaschenbücher-Verlag, Mannheim 1967

(3) H.SCHINK, Fibel der Verfahrenstechnik, R.Oldenbourg Verlag, München-Wien 1971

(4) P.O.FANGER, Thermal Comfort, McGraw-Hill Book Company, New York 1972

(5) McNALL JR., NEVINS R.G. et al., Thermal comfort (thermally neutral) conditions for three levels of activity. ASHRAE Trans. 73, I, 1967

(6) NEVINS R.G. et al., A temperature-humidity chart for the thermal comfort of seated persons ASHRAE Trans. 72, I, 283-291, 1966

(7) Handbuch der gesamten Arbeitsmedizin, Urban&Schwarzenberg Verlag, Berlin-München-Wien 1961

(8) YAGLOU C.P. and MILLER C.E., Effective temperature with clothing. ASHVE Trans. 31, 89-99, 1925

(9) BEDFORD TH., Basic priciples of ventilation and heating, H.K.Lewis&Co. LTD, London 1948

(10) McARDLE et al., The prediction of the physiological effects of warm and hot environments, Royal Naval Personel Res. Comm. Med. Res. Council, London Report No. 47/391, 1947

(11) WENZEL H.G., Messungen der körperlichen Leistungsfähigkeit bei Hitzearbeit, Zbl. Arb.wiss. 15 (1961) 17

(12) YAGLOU C.P., Temperature, humidity and air movement in industries. The effective temperature index. J. industr. Hyg. 9 (1927), 297, 351

(13) ROBINSON S. et al., Physiologically equivalent conditions of air temperature and humidity, Amer. J. Physiol. 143 (1945),21

(14) COMFY-TEST, Instruction manual, Reci Ltd. Copenhagen

(15) KLEIBER-KARSTEN, Lehrbuch der Physik, München-Berlin 1941, Verlag von R. Oldenbourg, 25. Auflage

8. Anhang

Liste des verwendeten FORTRAN-Programmes

```
C      PROGRAM RITZ
C
C      STATEMENTS
       REAL P(20,60,3),TMV(20)
       REAL RHMV(20),DEV(200)
       INTEGER NR(20),SEX(20),W(20),H(20),AGE(20)
       INTEGER LIST(100,50),BN(100,50)
C
C      FIELD P STORES TEMP IN FIRST FLAT, RHUM IN 2ND
C      AND BALLOT IN 3RD, SO P( , ,1) RECALLS TEMP.
C
C      BLANKING INPUT FIELDS
       DO 5 I=1,20
       NR(I)=0
       DO 5 J=1,60
       DO 5 K= 1,3
     5 P(I,J,K)=0.
C
C      DATA INPUT
       DO 20 II=1,20
    20 READ(5,200)I,SEX(I),W(I),H(I),AGE(I)
   200 FORMAT(I2,I1,I2,I3,I2)
       IANZ=0
       DO 10 II=1,1500
       READ(5,100)I,A,B,C
       IF(I.EQ.77) GO TO 77
       IANZ=IANZ+1
C
C      CHECK OF DATA INPUT
       IF(I.LT.1.OR.I.GT.20) GO TO 777
       IF(A.LT.20.OR.A.GT.40) GO TO 777
       IF(B.LT.0.OR.B.GT.100) GO TO 777
       IF(C.LT.0.OR.C.GT.7) GO TO 777
   776 GO TO 778
   777 WRITE(6,300) II,I,A,B,C
   300 FORMAT(1HO,'   ERROR ',I4,3X,I2,3F10.5)
C
C      WRONG DATA WON'T BE STORED
       GO TO 10
   778 CONTINUE
C
C      IF DATA CORRECT, INPUT CONTINUED
       NR(I)=NR(I)+1
```

```
      P(I,NR(I),1)=A
      P(I,NR(I),2)=B
      P(I,NR(I),3)=C
  100 FORMAT(I2,F3.1,F2.0,F1.0)
   10 CONTINUE
   77 WRITE(6,500)
      WRITE(6,400)IANZ
  400 FORMAT(1HO,10X,I4,' DATA CARDS HAVE BEEN RED.')
C
C     PRINT OF PERSONAL DATA
      WRITE(6,500)
  500 FORMAT(1H1)
      DO 30 I=1,20
   30 WRITE(6,600)I,SEX(I),W(I),H(I),AGE(I)
  600 FORMAT(1HO,I2,X,I1,X,I2,X,I3,X,I2)
      WRITE(6,500)
C
C     CALCULATION OF PERSONAL MEAN
C     VALUE OF COMFORT TEMPERATURE
      DO 50 I=1,20
      RHSUM=0.
      SUM=0.
      HILF=0.
      JJ=NR(I)
      DO 60 J=1,JJ
      IF(P(I,J,3)-4) 60,59,60
   59 IF(P(I,J,2).LT.75.) GO TO 60
      SUM=SUM+P(I,J,1)
      RHSUM=RHSUM+P(I,J,2)
      HILF=HILF+1.
   60 CONTINUE
      RHMV(I)=RHSUM/HILF
   50 TMV(I)=SUM/HILF
C
C     PRINT OF PERSONAL TMV'S AND RHMV'S
      DO 510 I=1,20
  510 WRITE(6,520) I,TMV(I),RHMV(I)
  520 FORMAT(/,16X,I2,3X,F10.2,3X,F10.2)
C
C     SEX MEAN VALUE OF COMFORT TEMP.
      HILF=0.
      HILF1=0.
      SUM=0.
      SUM1=0.
      DO 110 I=1,20
      IF(SEX(I)) 119,119,120
  119 SUM=SUM+TMV(I)
      HILF=HILF+1.
      GO TO 110
  120 SUM1=SUM1+TMV(I)
```

```
      HILF1=HILF1+1.
  110 CONTINUE
      TMO=SUM/HILF
      TM1=SUM1/HILF1
C     PRINT SEX MEAN VALUE OF COMFORT TEMP.
      WRITE(6,700) TMO,TM1
  700 FORMAT(1HO,10X,'FEMALE',F7.2,5X,'MALE',F7.2)
C
C     OVERALL MEAN VALUE OF COMFORT TEMP.
C     AND RELATIVE HUMIDITY
      SUM=0.
      RHSUM=0.
      DO 220 I=1,20
      RHSUM=RHSUM+RHMV(I)
  220 SUM=SUM+TMV(I)
      OTMV=SUM/20.
      ORHMV=RHSUM/20.
      WRITE(6,800)OTMV
  800 FORMAT(1HO,10X,'OVERALL TMV ',F6.2)
      WRITE(6,801) ORHMV
  801 FORMAT(1HO,10X,'OVERALL RHMV ',F6.2)
C
C     TRANSFORMATION OF TEMPERATURES USING
C     CALCULATED OVERALL TEMP.MEAN VALUE
      DO 240 I=1,20
      Z=TMV(I)-OTMV
      JJ=NR(I)
      DO 240 J=1,JJ
      ZHILF=P(I,J,1)-Z
      IF(ZHILF.LT.20.2.OR.ZHILF.GT.39.8)GOTO247
      GO TO 240
  247 ZHILF=20.2
      P(I,J,2)=2.
C     EXCEEDING POINT WILL BE PRINTED
C     IN LOWER LEFT CORNER OF 'LIST'
      WRITE(6,900) I
  900 FORMAT(1H ,'WARNING:PERSON ',I2,' EXCEEDS'
     &,' TEMPERATURE RANGE')
  240 P(I,J,1)=ZHILF
C
C     BLANKING OUTPUT FIELDS
      DO 1005 I=1,100
      DO 1005 J=1,50
      BN(I,J)=0
 1005 LIST(I,J)=0
C
C     CONSTRUCTION OF OUTPUT FIELDS
C     'BN' CONTAINS NUMBER OF BALLOTS
C     'LIST' STORES BALLOTS AS 100*INTEGER
```

```
      DO 1010 I=1,20
      JJ=NR(I)
      DO 1010 J=1,JJ
      Z=(P(I,J,1)-20.)*5.+0.5
      K=IFIX(Z)
      L=IFIX(P(I,J,2)/5.+0.5)
      LIST(K,L)=LIST(K,L)+100*P(I,J,3)
      BN(K,L)=BN(K,L)+1
 1010 CONTINUE
C
C     CALCULATION OF MEAN VALUES OF LIST
      DO 1015 I=1,100
      DO 1015 J=1,20
      K=BN(I,J)
      IF(K.EQ.0) GO TO 1015
      LIST(I,J)=LIST(I,J)/K
 1015 CONTINUE
C
C     PRINT OF OUTPUT FIELDS
      DO 1100 IHILF=1,4
      IO=25*IHILF-24
      I1=25*IHILF
      WRITE(6,500)
      DO 1105 JJ=1,20
      J=20-JJ+1
      WRITE(6,2000)(LIST(I,J),I=IO,I1)
 1105 WRITE(6,2000)(BN(I,J),I=IO,I1)
 2000 FORMAT(1H ,25I4)
 1100 CONTINUE
      WRITE(6,500)
C
C     CALCULATION OF COMF.TEMP.
C     DEPENDENT ON REL.HUMIDITY
      DO 3010 IND=1,13
      IL=IND+4
      IR=IND+6
      Z=0.
      HILF=0.
      DO 3020 I=IL,IR
      DO 3030 J=1,100
      IZZ=LIST(J,I)
      IF(IZZ.LT.350.OR.IZZ.GT450)GOTO3030
      Z=Z+FLOAT(J)
      HILF=HILF+1.
C     COMF.VALUE MUST BE STORED FOR ST.DEV.
      DEV(IFIX(HILF))=FLOAT(J)
 3030 CONTINUE
 3020 CONTINUE
C     CALC. OF STANDARD DEVIATION
```

```
      XMEAN=Z/HILF
      SUM=0.
      KHILF=IFIX(HILF)
      DO 3040 I=1,KHILF
      XDEV=DEV(I)-XMEAN
 3040 SUM=SUM+XDEV*XDEV
      STDEV=0.2*SQRT(SUM/(HILF-1.))
      TEMP=20.+(Z/HILF)*0.2
      WRITE(6,3100) TEMP,STDEV,KHILF
 3100 FORMAT(1HO,'TEMP.:',F10.2,'STDEV',F10.2,
     &' N= ',I4)
 3010 CONTINUE
      WRITE(6,500)
C
C     CALC. OF COMFORT BORDERLINES
      DO 4005 IBORD=1,2
      ISMALL=300+100*(IBORD-1)
      IGREAT=ISMALL+100
      DO 4010 IND=1,13
      IL=IND+4
      IR=IND+6
      Z=0.
      HILF=0.
      DO 4020 I=IL,IR
      DO 4030 J=1,100
      IZZ=LIST(J,I)
      IF(IZZ.LT.ISMALL.OR.IZZ.GT.IGREAT)
     &GO TO 4030
      HILF=HILF+1.
      Z=Z+FLOAT(J)
 4030 CONTINUE
 4020 CONTINUE
      TEMP=20.+(Z/HILF)*0.2
      IF(IBORD-1) 4040,4040,4050
 4040 WRITE(6,4100) TEMP
 4100 FORMAT(1HO,' COLD TEMP.',F10.2)
      GO TO 4010
 4050 WRITE(6,4200) TEMP
 4200 FORMAT(1HO,' WARM TEMP.',F10.2)
 4010 CONTINUE
      WRITE(6,500)
 4005 CONTINUE
      WRITE(6,500)
C
C     END OF PROGRAM
      STOP
      END
```

Lebenslauf

Am 9.8.1951 wurde ich als Sohn des Maschinenschlossers Wilhelm Ritz und seiner Ehefrau Hildegard Ritz, geb. Bolten, in Lank geboren.

Von 1958 bis 1962 besuchte ich die Volksschule in Osterath, anschließend das Fichte-Gymnasium in Krefeld, an dem ich 1970 meine Reifeprüfung ablegte.

Im Wintersemester 1970/71 begann ich an der Universität Düsseldorf das Studium der Mathematik mit dem Nebenfach Theoretische Physik. Ich fertigte eine Diplomarbeit auf dem Gebiet der angewandten Mathematik an und erhielt am 18.5.1976 mein Diplom-Zeugnis.

Seit dem Sommersemester 1976 studiere ich Medizin an der Universität Düsseldorf und bin seit 1980 Doktorand am Institut für Arbeitsmedizin beim Staatlichen Gewerbearzt Düsseldorf.